

# Проектирование рамных узлов производственных одноэтажных зданий по ТКП EN 1993 и их моделирование в программных комплексах

Хомич В.И.

Научный руководитель – Кононович К.В.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

## Введение

Необходимо отметить, что в используемом для расчёта металлоконструкций ранее СНиП 23-81\* [3] не давалось каких-либо конкретных указаний для проектирования узлов и соединений. Все рекомендации, которыми могли пользоваться студенты и проектировщики, содержались в справочной литературе. В это же время, [1] содержит принципы проектирования основных типов узлов, которые служат основанием для проектирования или же для написания справочной литературы, такой как, например, [6].

При разработке рассматриваемого узла следует руководствоваться главой 6 [4], полностью посвященной узлам сопряжения элементов из двутавров.

Работа элементов узла по восприятию усилий проиллюстрирована на рисунке:

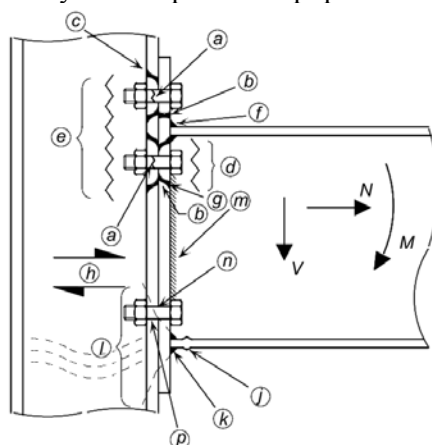


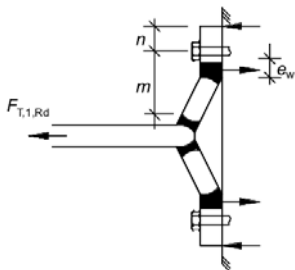
Рис.1. Восприятие усилий элементами рамного узла)

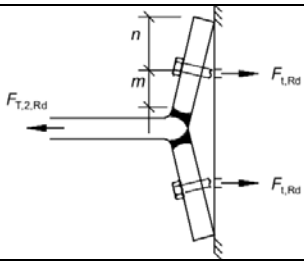
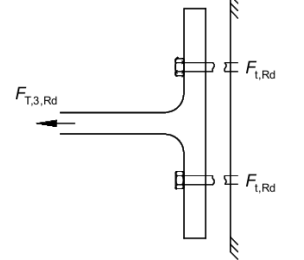
В первую очередь производится расчет болтов в растянутой зоне (стоит отметить, что для эффективной работы болтов, следует производить четкое разделение двух зон: зоны растяжения и зоны среза болтов, ведь с увеличением «плеча» верхней группы болтов увеличивается и момент, который они способны воспринять). При этом производится сначала расчет каждого ряда болтов в отдельности, а потом групп рядом стоящих болтов вместе.

## Методика расчёта рамных узлов

Согласно [1] расчет следует производить по методу «Т-элемента», вовлекаемого в работу колонны при растяжении болтов. Согласно этому методу, существует три модели разрушения, представленные в таблице:

Таблица 1. Модели разрушения «Т-элементов»

Описание модели	Рисунок	Расчет
Развитие пластических деформаций в полке колонны		$F_{T,1,Rd} = \frac{(8n - 2e_w) M_{pl,1,Rd}}{2mn - e_w(m + n)}$ $M_{pl,1,Rd} = 0.25 \sum \ell_{eff,1} t_f^2 f_y / \gamma_{M0}$ <p>-пластический момент инерции эквивалентного «Т-элемента»</p>

Описание модели	Рисунок	Расчет
Развитие пластических деформаций в полке колонны одновременно с отказом болтов		$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n(\sum F_{t,Rd})}{m+n}$ $M_{pl,2,Rd} = 0.25 \sum \ell_{eff,2} t_f^2 f_y / \gamma_{M0}$ <p>- пластический момент инерции эквивалентного «Т-элемента»</p>
Отказ болтов при линейной работе полки колонны		$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd}$ <p><math>\sum F_{t,Rd}</math> - сумма сопротивлений болтов рассматриваемого ряда (группы рядов) на растяжение</p>

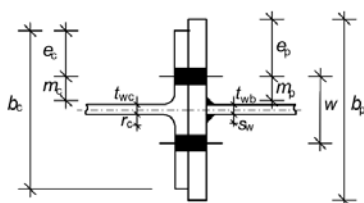


Рис 2. Основные геометрические характеристики для расчета по методу «Т-элемента»

Эффективная длина стенки колонны определяется согласно табл. 6.4 и 6.5 [4], для большего понимания принципа определения расчетного случая в зависимости от характера линий текучести, следует обратиться к табл. 2.2 [5].

После расчета рядов болтов в растянутой зоне может потребоваться коррекция усилий, воспринимаемых вышележащими рядами болтов из условия их работы в упругой стадии, чтобы избежать случая, когда верхний ряд болтов переходит в пластическую стадию работы для обеспечения расчетного сопротивления нижнего.

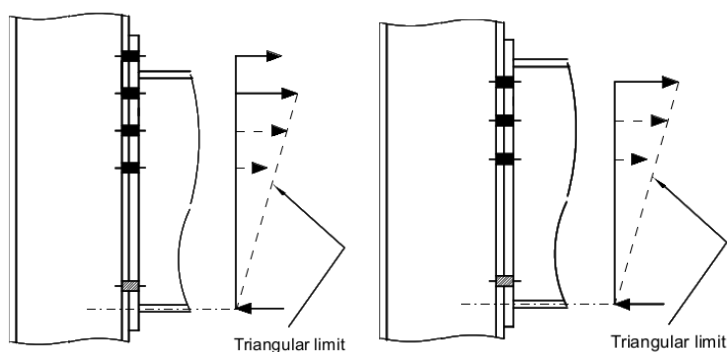


Рис 3. Линейное ограничение усилий, воспринимаемых болтами для увеличенной торцевой пластины (слева) и торцевой пластины нормальной величины (справа)

Следующим важным этапом расчета является расчет стенки колонны и стенки балки на растяжение:

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega b_{eff,t,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} \quad F_{t,wb,Rd} = \frac{b_{eff,t,wb} t_{wb} f_{y,wb}}{\gamma_{M0}}$$

Расчет производится на основании метода «Т-элемента», длина которого определяется аналогично вышеизложенному способу отдельно для стенки колонны и стенки балки.

Расчет сжатой зоны и расчет полки колонны на срез производится в соответствии с п.6.2 [4].

После определения несущей способности стенки колонны на сжатие, следует снова скорректировать усилие, которое способны нести болты растянутой зоны:

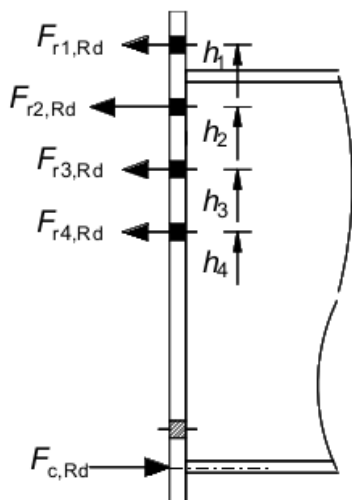


Рис 4. Коррекция усилий в болтах растянутой зоны

Уточнение усилий производится с целью выполнения следующего условия:

$$\Sigma F_{ri} + N_{Ed} \leq F_{c,Rd}$$

Иначе, может получиться, что болты растянутой зоны способны воспринять такой условный изгибающий момент, который не способна выдержать стенка колонны из условия работы на сжатие.

Заключительным этапом расчета элементов узла является определение несущей способности болтов на срез. Важной особенностью методики расчета любого болтового соединения по [4] является возможность учета работы болта одновременно и на срез, и на растяжение. Данный расчет не может стать исключением. Согласно таблице 3.4 [4] необходимо определить несущую способность болтов растянутой зоны на срез как 28 процентов от  $\Sigma F_{t,Rd}$  (с учетом коррекции), а далее производить расчет болтов зоны среза на срез по «оставшемуся» внешнему усилию.

Окончательный этап расчета имеет самое важное значение: определяется несущая способность принятой конфигурации узла:

- По продольной силе по наименьшему из значений несущей способности полки колонны и полки балки на сжатие/растяжение
- По поперечной силе по несущей способности болтов из зоны сжатия на срез
- По изгибающему моменту на основании несущей способности болтов из зоны растяжения на растяжение с учетом корректировок усилий в болтах, а также по несущей способности элементов соединения на растяжение и сжатие

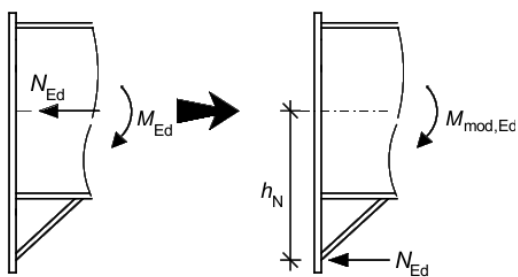
В случае, если несущая способность узла не обеспечена, требуется производить усиление методами, не противоречащими [4]

#### **Усиление узлов**

Усиление рамных узлов может включать в себя как добавление дополнительных конструктивных элементов, так и модификацию существующих.

#### Вуты

Одним из наиболее интересных, простых и широко применяемых методов усиления являются вуты. Конструктивные требования к ним описаны в п. 6.2.6.7 [4]. Особенность вута в том, что его применение изменяет не несущую способность узла, а внешнее усилие, как показано на рисунке:



$$M_{mod,Ed} = M_{Ed} - N_{Ed} \times h_N$$

Рис5. Работа вута балки.

Согласно [4]:

- сталь вутов должна соответствовать стали элемента
- размер полки и толщина стенки вута должны быть не меньше размеров аналогичных элементов балки
- угол между полкой вута и полкой балки не должен превышать  $45^\circ$

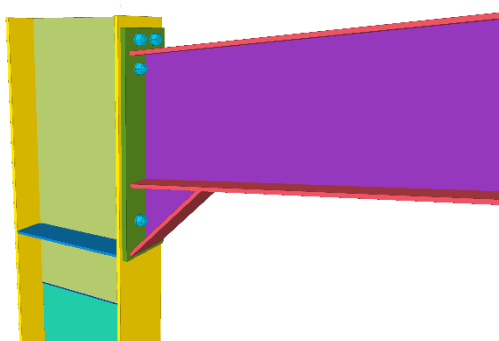


Рис 6. Узел, усиленный вутом.

#### Усиление зоны растяжения

Усиление зоны растяжения производится установкой дополнительных ребер жесткости в колонну.

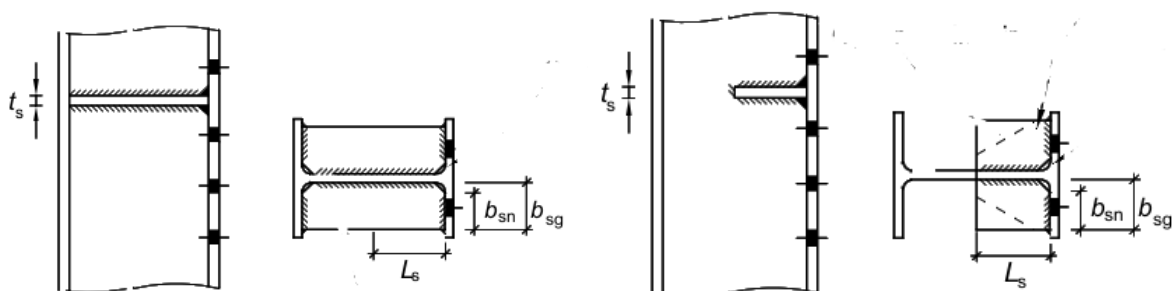


Рис7. Усиление зоны растяжения нормальным ребром (слева), ребром оптимальной длины (справа)

$$L_s \geq \frac{F_{s,Ed} \sqrt{3} \gamma_{M0}}{t_{wc} f_{y,c}}$$

Работа подобного усиления оценивается так:

$$F_{s,Ed} = \frac{m_1}{2} \left[ \frac{F_{r1,Rd}}{(m_1 + m_{2L})} + \frac{F_{rj,Rd}}{(m_1 + m_{2U})} \right]$$

#### Усиление зоны сжатия

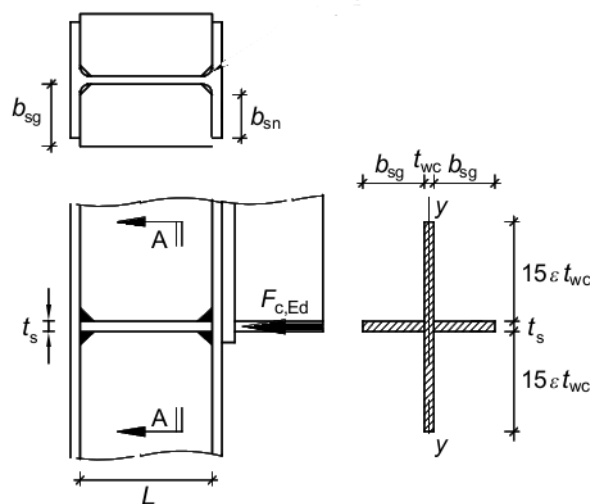


Рис 8. Конструкция усиления зоны сжатия

Работа данного усиления основывается на изменении сечения элемента, работающего на сжатие. Основновополагающей характеристикой является площадь. Помимо прочего необходима проверка ребра жесткости на потерю устойчивости согласно [1] по изгибной форме:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \times A_{s,eff} \times f_y}{\gamma_{M1}}$$

#### Усиление стенки колонны

Усиление стенки колонны может производиться тремя основными способами:

- Использование односторонней накладки
- Использование двусторонней накладки
- Использование стенки колонны с переменной толщиной

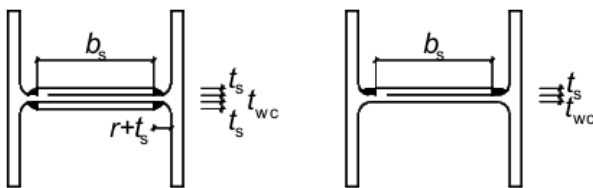


Рис 9. Конструктивные решения накладок на стенку колонны

Очевидно, что наиболее технологичным является третий тип усиления (он же показан на рисунке 11), но его применение возможно лишь в случае использования сварных двутавров в качестве колонны. При использовании любого усиления стенки колонны проводятся ее проверки согласно главе 6 [4], при этом в качестве толщины стенки используется суммарная толщина стенки колонны и накладки (или накладок).

#### Изгибное усиление полки колонны

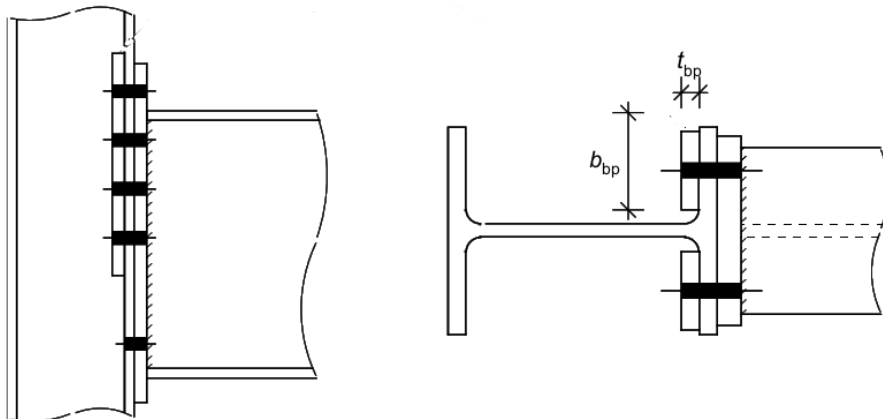


Рис 10. Усиление колонны контрпланками

Эффект от применения данного усиления описывается, как для первой модели разрушения из таблицы 2, но со следующими изменениями:

$$F_{T,Rd} = \frac{(8n - 2e_w)M_{pl,Rd} + 4nM_{tp,Rd}}{2mn - e_w(m + n)}$$

#### Диагональное усиление

Диагональное усиление целесообразно применять, когда требуется усилить узел сразу по двум пунктам.

Основные типы диагонального усиления:

- N-тип: применяется когда требуется серьезное усиление сжатой зоны, и может использоваться одновременно с рядовым усилением сжатой зоны
- К-тип: применяется, когда высота присоединяемой балки значительно больше высоты колонны. Требуется особое внимание к условиям обеспечения доступа к болтам. Верхняя часть работает на растяжение и рассчитывается аналогично усилению растянутой зоны, нижняя – на сжатие и рассчитывается аналогично усилению сжатой зоны
- Усиление «Морриса» применяется в случае, когда необходимо усиление растянутой зоны и предъявляются особые требования к размещению болтов.

Помимо прочего, указанные типы усиления участвуют в работе стенки колонны на сдвиг, на основании чего также может определяться их площадь:

$$A_{sg} \geq (V_{wp,Ed} - V_{wp,Rd}) / f_y \cos \theta$$

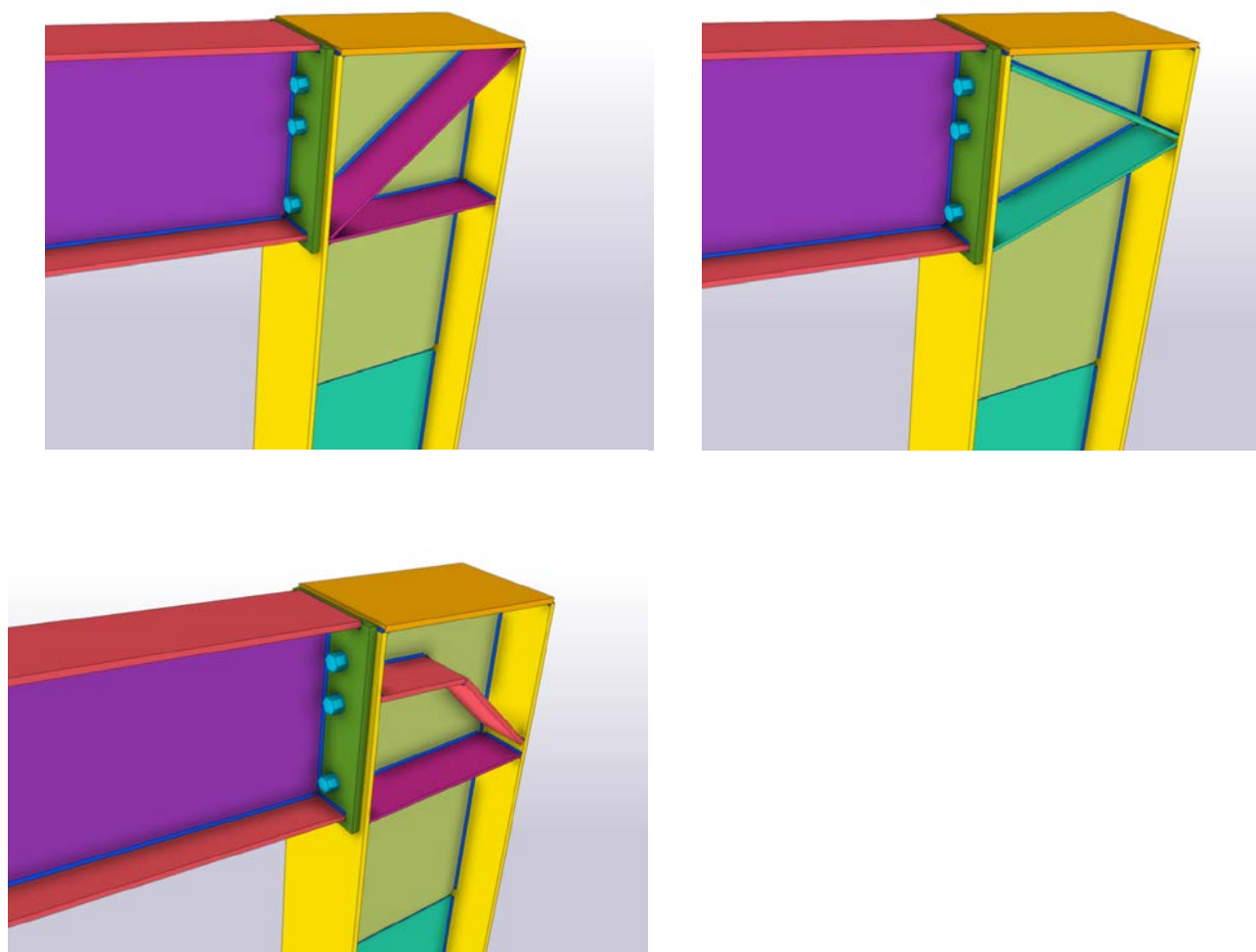


Рис 11. Диагональное усиление: «N-тип», «К-тип», усиление «Морриса» (по часовой стрелке)

### Заключение

Приведенный расчёт рамных узлов является хорошо описанным и проработанным, но при этом достаточно сложным и трудоёмким при ручном расчёте. В связи с этим наиболее актуальным и прогрессивным на данный момент является моделирование рассматриваемых узлов в программных комплексах.

Наиболее удобными программами для этого являются RFEM и IDEA statica. Ниже приведено сравнение двух программных комплексов при моделировании конкретных рамных узлов.

Таблица 2. Сравнительный анализ возможностей RFEM и IDEA statica

Пункт сравнения	RFEM	IDEA statica
Возможность удобного создания узла	Узел создается в на основе уже готовой геометрии	Узел создается на основе существующих шаблонов (для этого типа узлов они достаточно точные)
Возможность удобного задания нагрузок	Узел рассчитывается на наиболее неблагоприятные сочетания	Нагрузки задаются только вручную
Возможность создания нетипового узла	- (см. рис. 19)	Любая геометрия узла
Удобное получение развернутых отчетов	+	+
Возможность экспорта/импорта из/в tekla structures	Возможен как экспорт, так и импорт	Возможен только импорт, при этом сварные швы не импортируются и требуют ручной настройки
Возможность получения карты напряжений	-	Только эквивалентные напряжения (без учета знака)
Возможность получения чертежей элементов узла	+	+
Возможность расчета усиления узлов	Ограниченный набор видов усиления	Любое усиление
Расчет сварных швов	+	+

Вывод: обе программы позволяют провести достаточно детальный расчет типовых узлов, а для расчета нетиповых узлов (например, аналогичных приведенным в [7]) следует применять IDEA statica

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ТКП EN 1993-1-1-2009\* Проектирование стальных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий
2. Серия 1.460.3 – 23.98 Стальные конструкции покрытий производственных зданий из замкнутых гнутосварных профилей прямоугольного сечения пролетом 18, 24 и 30 метров с уклоном кровли 10%
3. СНиП II-23-81\*. Строительные нормы и правила. Нормы проектирования. Стальные конструкции
4. ТКП EN 1993-1-8-2009\* Проектирование стальных конструкций. Часть 1-8. Расчет соединений
5. Joints in Steel Construction. Moment resisting Joints to Eurocode 3. - The British Constructional Steelwork Associational Limited – London, UK
6. Надольский В.В. Расчет и конструирование фланцевого соединения элементов прямоугольного сечения, подверженных центральному растяжению/
7. В. В. Надольский // Строительство. Прикладные науки. – 2018. №8. - С. 121-130.
8. Серия 2.440-1 Выпуск 1. Рамные и шарнирные узлы балочных клеток и примыкания ригелей к колоннам